

# Análisis mecánico de herramienta para remover sedimentos minerales en ademes de pozo profundo

**Martínez Morales Marcelino**

Instituto Tecnológico de Celaya  
*mtzmarcelinomec@hotmail.com*

**Raúl Lesso Arroyo**

Instituto Tecnológico de Celaya  
*raul.lesso@itcelaya.edu.mx*

**Carlos Rafael Aguilar Nájera**

Instituto Tecnológico de Celaya  
*rafael.aguilar@itcelaya.edu.mx*

## Resumen

Cuando la tubería (ademe) de un pozo profundo se colapsa, resulta imperativo la restauración del mismo. Para esta operación es empleada una herramienta llamada “prensa hidráulica”. El presente trabajo muestra el análisis de simulación de esta herramienta en la parte que corresponde estrictamente a la remoción de sedimentos minerales acumulados en forma de cáscara en la pared interior de la tubería de ademe. Conviene decir que la prensa hidráulica no se emplea para remover sedimentos debido al temor de que la tubería se colapse y la herramienta quede atrapada. La simulación recrea la operación de la herramienta considerando las condiciones de trabajo a las que va a ser sometida, teniendo como objetivo verificar si el dispositivo es mecánicamente resistente para la operación que se quiere realizar y determinar si puede remover la cáscara, cuantificando los efectos producidos sobre la estructura de la tubería durante

su operación. Los resultados obtenidos en la simulación aprueban el uso de la prensa hidráulica para la remoción de sedimentos.

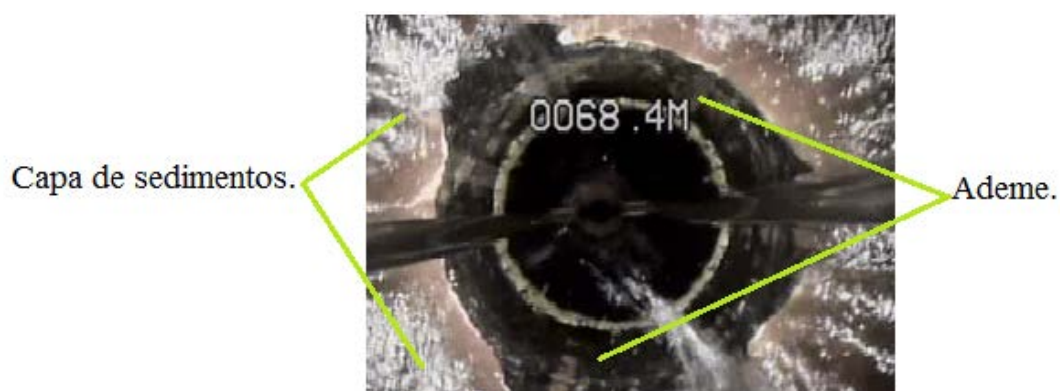
**Palabra(s) Clave(s):** Ademe, pozo profundo, prensa hidráulica, sedimentos minerales.

## **1. Introducción**

La extracción de agua del subsuelo por medio del bombeo en pozos profundos es primordial en todos los sectores económicos y sociales del país, magnificando la importancia de mantener en buen estado las condiciones de funcionamiento de un pozo profundo.

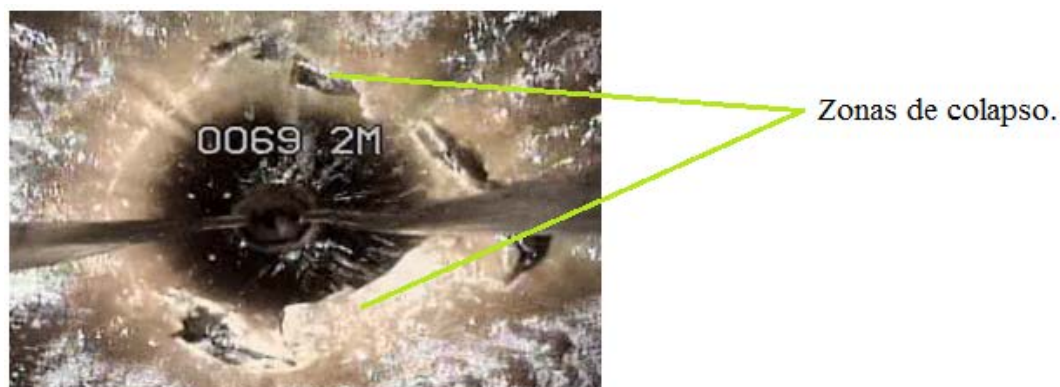
Uno de los problemas más comunes que se presenta (en algunas regiones) en los pozos profundos, es la disminución del nivel estático de agua provocado en algunos casos por que las ranuras, por donde se filtra el agua del acuífero hacia el interior del pozo, son obstruidas por formaciones rocosas de sedimentos minerales, que forman una capa en la pared interior del ademe, ver Fig. 1.

Existen varios métodos empleados para efectuar la remoción de la cáscara: limpieza por ácido, cepillado, limpieza a base de microexplosiones, etcétera, [1], sin obtener buenos resultados, pues solo la remueven parcialmente. Se propone entonces usar la prensa hidráulica para la remoción de sedimentos como una solución a este problema, a la espera de obtener resultados satisfactorios. La remoción de los sedimentos minerales que forman la cáscara podría en algunos casos y bajo algunas consideraciones aumentar el nivel estático de agua del pozo y por lo tanto, aumentar su rendimiento en la extracción del líquido [2].



**Fig. 1. Formaciones de sedimentos minerales.**

Cuando se utiliza la prensa hidráulica en ademes que además de estar colapsados tienen acumulación de sedimentos rocosos, ver Fig 2, se ha observado que los sedimentos cercanos a la zona de rehabilitación son removidos. En la Fig. 3 se muestra una zona del ademe reconstruida por la prensa hidráulica donde no existen sedimentos en los alrededores. Con estos indicios se puede suponer que la prensa también puede ser utilizada para la remoción de los mismos.



**Fig. 2. Ademe colapsado y con acumulación de sedimentos rocosos.**

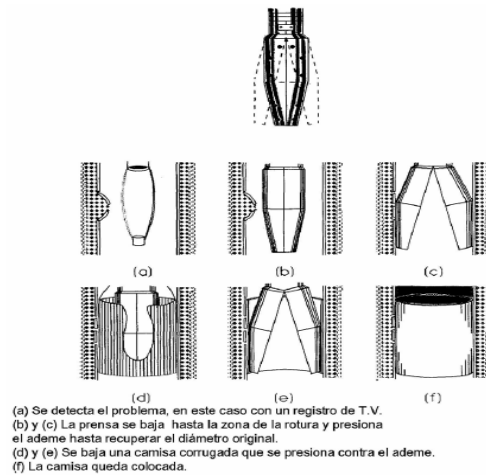


**Fig. 3. Desprendimiento de cáscara en zonas cercanas a la operación de la prensa.**

## **2. Desarrollo**

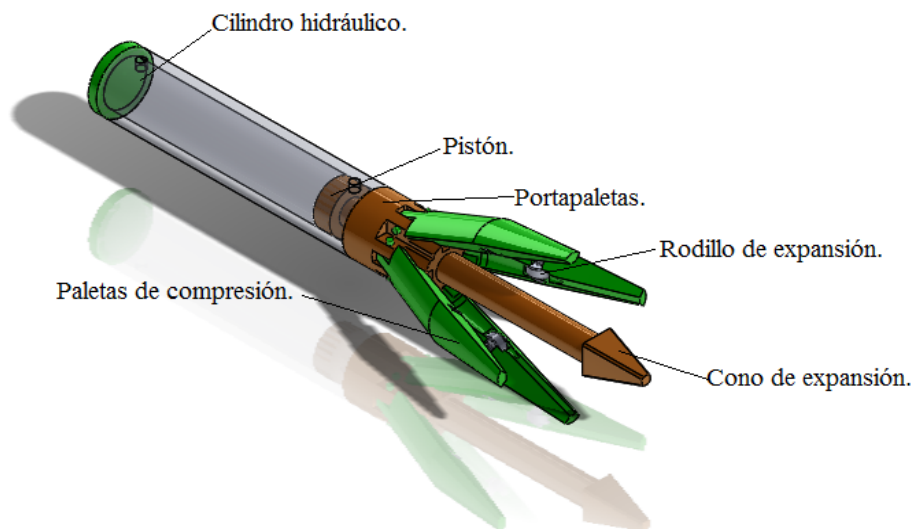
### **2.1 Simplificación del sistema y modelado**

La prensa hidráulica es una herramienta utilizada para la reparación de ademes colapsados instalados en pozos profundos para la extracción de agua, el colapso es provocado por las fuerzas que actúan en la parte externa del tubo a través del suelo. La función de la herramienta es restaurar la falla por medio de la instalación de un segmento de tubo llamado camisa. Esta operación se lleva a cabo al colocar y expandir un segmento de tubo corrugado en la zona de colapso, la expansión del tramo corrugado es producida por la prensa hidráulica, después de la expansión el ademe queda restaurado recuperando su forma. En la Fig. 4 se muestra el proceso de operación de una prensa hidráulica.



**Fig. 4. Proceso de operación de la prensa hidráulica.**

La Fig. 5 muestra el modelo virtual de una prensa hidráulica con los componentes que la constituyen. Esta es la réplica de un prototipo, el cual va a ser analizado para determinar su comportamiento mecánico, efectos sobre la estructura de ademe, efectos sobre la capa de cáscara y determinar así la funcionalidad de la herramienta al ser empleada para la remoción de sedimentos.

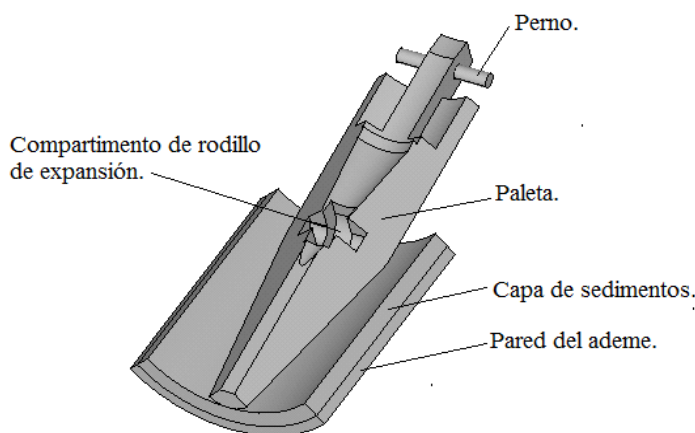


**Fig. 5. Modelo en CAD de la prensa hidráulica.**

Analizando el funcionamiento de la herramienta y de la operación que ejecuta se determinó que para el análisis por elemento finito y para los propósitos de la investigación era suficiente analizar solamente los componentes más críticos, que es donde pueden presentarse los esfuerzos máximos y en consecuencia posibles fallas: las paletas, los pernos, la capa de sedimentos y el tubo de ademe.

La Fig. 6 muestra la simplificación de la herramienta y de la estructura del ademe, se puede observar que también se realizó una simplificación por simetría, permitiendo así que solo se analice una cuarta parte del sistema, esta simplificación no influye en los resultados, pues se obtendrían los mismos si se realizara el análisis de la herramienta completa, economizando tiempo de cómputo, obteniendo una solución más rápida.

Las dimensiones de interés son: diámetro del ademe = 324 mm, espesor del ademe = 9.525 mm, estas dimensiones son las más comunes utilizadas en los pozos profundos [3]. La capa de sedimentos tiene un espesor de 25.4 mm, este es el valor máximo encontrado en las muestras de sedimentos obtenidas.



**Fig. 6. Simplificación del sistema.**

## **2.2 Materiales utilizados**

Los materiales utilizados en los componentes de la herramienta (paleta y perno) están constituidos de acero AISI 4140, con las siguientes propiedades [4]:

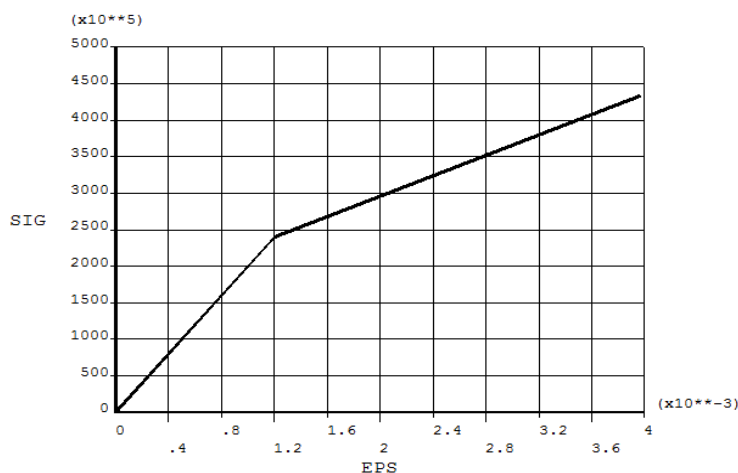
- Módulo elástico  $E = 200 \text{ GPa}$
- Resistencia de fluencia  $S_y = 690 \text{ MPa}$
- Resistencia última  $S_{ut} = (900- 1050) \text{ MPa}$

El modelo constitutivo para los componentes de la prensa es lineal, es decir, se considera únicamente el comportamiento elástico, ya que se espera tener esfuerzos por debajo de la fluencia en los componentes de la prensa.

El material de la tubería, según la norma mexicana para fabricación de ademes debe de cumplir con los requerimientos mínimos siguientes [5]:

- Módulo elástico  $E = 200 \text{ GPa}$
- Resistencia de fluencia  $S_y = 242 \text{ MPa}$
- Resistencia última  $S_{ut} = 414 \text{ MPa}$

Según estos requerimientos y al no contar con una curva estándar para el material del tubo se propone una curva bilineal, ver Fig. 7 tratando de generalizar el comportamiento para los diferentes aceros usados en la fabricación de ademes. La gráfica presenta una curva esfuerzo- deformación ( $\text{MPa-mm/mm}$ ) con dos pendientes, representando la parte elástica con un esfuerzo máximo de 242 MPa y el comportamiento plástico con un esfuerzo máximo de 414 MPa.



**Fig. 7. Curva bilineal, para el tubo de ademe.**

Se obtuvieron muestras de sedimentos extraídas de las profundidades de un pozo con acumulación de sedimentos, la figura 8 muestra los trozos de cáscara obtenidos.

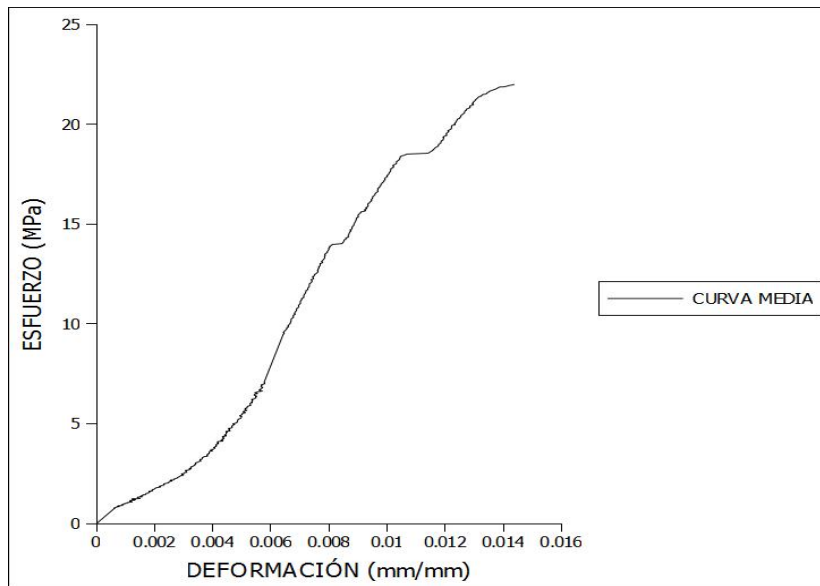


**Fig. 8. Muestras de sedimentos minerales.**

Al material extraído se le realizó un estudio de composición por medio de microscopía de barrido logrando identificar este material como óxido de calcio, con un contenido de 45.2 % de calcio y 54.8 % oxígeno, posteriormente se hizo la caracterización del material



realizando ensayos de compresión sobre probetas que se obtuvieron a partir de las muestras de óxido de calcio. De los datos recopilados en los experimentos se obtuvo la gráfica de la Fig. 9. En esta gráfica se puede apreciar que existe un cambio brusco de pendiente entre los 13 y 15 MPa, que es cuando inicia el agrietamiento del sedimento. Aunque el esfuerzo último de compresión alcance valores superiores a 20 MPa, para efectos de la simulación se tomará el valor de 15 MPa como la resistencia última de compresión del sedimento.



**Fig. 9. Comportamiento esfuerzo-deformación del óxido de calcio.**

En la Fig. 10 se puede observar que la probeta ya está agrietada y se ha producido la falla.



**Fig. 10. Agrietamiento y reacomodo de la probeta.**

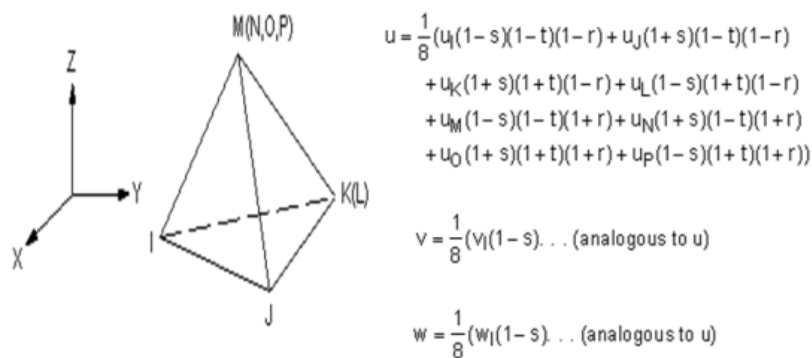
La tabla 1 fue obtenida a través de los datos registrados por la máquina donde fueron realizados los ensayos de compresión. Esta información describe el comportamiento del sedimento al ser sometido a compresión que será necesaria para establecer un modelo constitutivo multilineal plástico en el análisis.

### **2.3 Mallado del sistema**

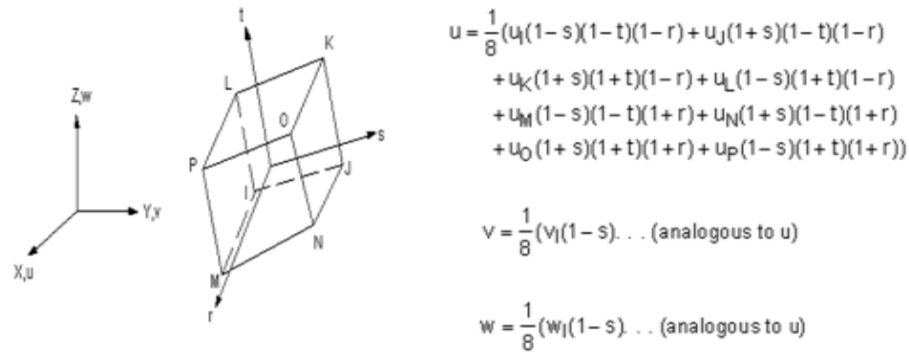
Para el mallado del sistema se utilizó el elemento solid 185 (designación ANSYS), que puede tomar la forma de tetraedros o hexaedros conformados por ocho nodos y tres grados de libertad en cada nodo, se seleccionaron estos elementos ya que las características del análisis así lo permiten, siendo este un análisis estructural estático sin grandes deformaciones pero si plástico. Otra de las ventajas de utilizar este elemento es que permite acoplarse muy bien a geometrías irregulares las cuales existen en el sistema analizado. Las ecuaciones generales que caracterizan a este elemento, que tienen que resolverse para este análisis, son las que se muestran en las Fig. 11 y 12:

<b>Esfuerzo (MPa)</b>	<b>Deformación unitaria (m/m)</b>
<b>4.178</b>	<b>0.000891</b>
<b>9.884</b>	<b>0.001427</b>
<b>16.498</b>	<b>0.003549</b>
<b>16.727</b>	<b>0.004366</b>
<b>17.988</b>	<b>0.004858</b>
<b>18.305</b>	<b>0.005295</b>
<b>20.727</b>	<b>0.006509</b>
<b>22.047</b>	<b>0.007571</b>
<b>23.537</b>	<b>0.008601</b>
<b>24.007</b>	<b>0.009608</b>
<b>24.116</b>	<b>0.010540</b>

**Tabla 1. Datos experimentales de curva esfuerzo-deformación.**



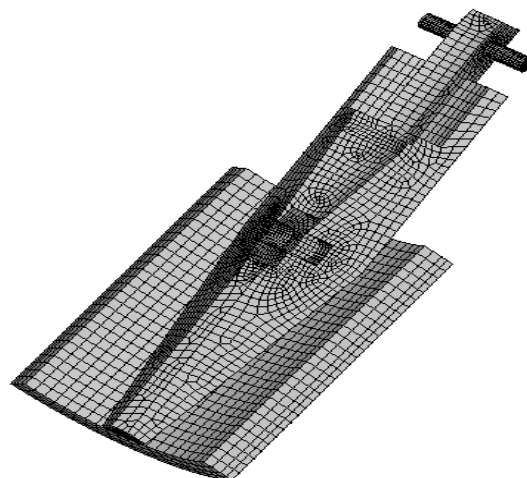
**Fig. 11. Elemento tetraédrico y funciones de forma.**



**Fig. 12. Elemento hexaédrico y funciones de forma.**

Las variables u, v, w representan los desplazamientos a partir del origen de coordenadas global y las variables s, t, r describen los desplazamientos a partir de un origen coordenado local.

También se utilizó el elemento mesh 200 (designación ANSYS), este elemento es un recurso para lograr tener un patrón de mallado en las áreas irregulares formada de rectángulos para posteriormente mallar los sólidos con el elemento solid 185 y obtener una malla formada por hexaedros. Esta forma de mallado únicamente se ha utilizado en la paleta ya que es la que tiene geometrías irregulares. La Fig. 11 muestra la malla final que tiene un total de 50, 000 elementos aproximadamente. Se realizaron algunos otros mallados para monitorear la sensibilidad de la malla.

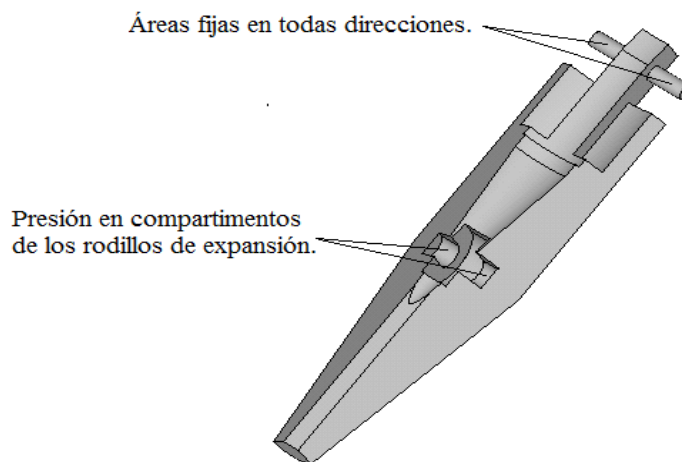


**Fig. 11. Malla del sistema.**

## 2.4 Condiciones de frontera

Las restricciones aplicadas al sistema son las siguientes:

Se aplicó una presión en la paleta en la zona donde va colocado el rodillo de expansión de 80 MPa, esta presión produce aproximadamente una fuerza de 102.2 kN, fuerza con la cual es empujada la paleta para entrar en contacto con la capa de sedimentos. El valor se determinó realizando iteraciones hasta alcanzar el valor de esfuerzo en el cual la cáscara falla, que es a partir de este suceso cuando se espera observar y analizar el comportamiento de los componentes de la herramienta, ver Fig. 12.

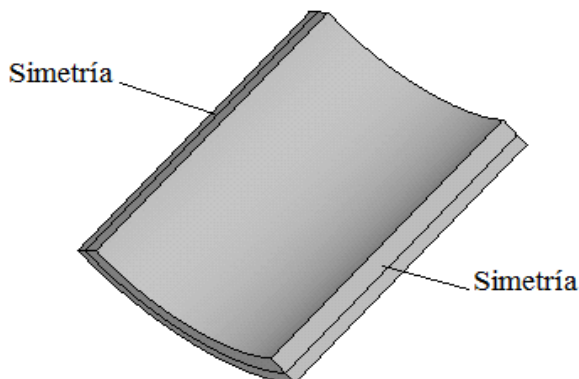


**Fig. 12. Condiciones de frontera en paleta y perno.**

El perno de pivote de la paleta se encuentra restringido en las áreas sobresalientes en todas direcciones, éste permanece fijo en el porta-paletas por lo tanto esta restricción define su comportamiento durante la operación de la herramienta, ver Fig. 12.

La pared de cáscara y la pared de tubo forman una sola pared compuesta, para éstas se han aplicado las mismas condiciones de frontera, asignando simetría a todas las áreas

que forman el contorno de estos volúmenes, suponiendo una cuarta parte de la sección de ademe Fig. 13.

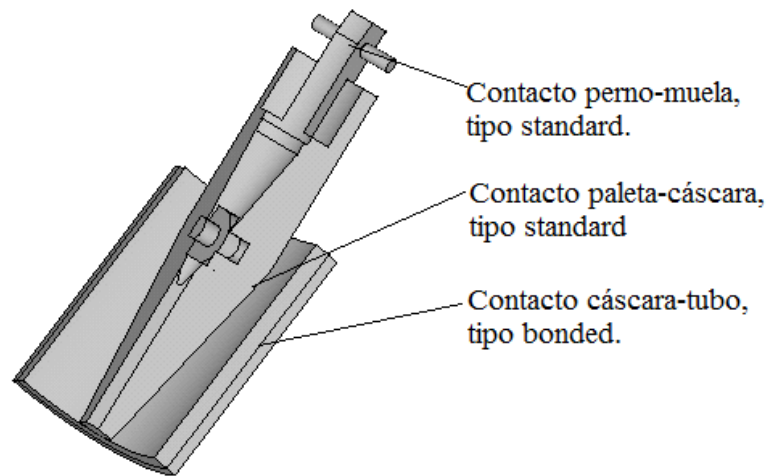


**Fig. 13. Restricciones de simetría en las paredes del tubo y cáscara.**

Otra condición de frontera es la presión externa en el tubo de ademe, que corresponde a la presión de colapso. Ésta supone los efectos del suelo sobre el ademe. La norma mexicana para la construcción de pozos profundos establece que para un diámetro de 324 mm y un espesor de 9.525 mm corresponde una presión de colapso igual a 5.37 MPa.

## 2.5 Contactos

Para relacionar los diferentes componentes que están en contacto durante la simulación se asignó un contacto de acuerdo al tipo relación entre las partes que interactúan. Fue usado un contacto del tipo estándar entre el perno y la paleta, al igual que entre la paleta y la cáscara. Este tipo de contacto permite el deslizamiento recíproco entre los elementos. También se usó un contacto del tipo bonded (designación ANSYS), suponiendo adherencia total entre la cáscara y la pared del tubo, ver Fig. 14.



**Fig. 14. Contactos establecidos en el sistema.**

### 3. Resultados

A continuación se muestran los resultados obtenidos en cada uno de los elementos que fueron analizados.

#### 3.1 Perno

Los resultados que se obtuvieron para este elemento es un esfuerzo equivalente de Von Mises de 102 MPa con un desplazamiento máximo de  $0.51 \times 10^{-3} \text{m}$ . En cuanto al valor del esfuerzo se observa que está muy por debajo de la fluencia, con un factor de seguridad de 6.8. Por otro lado, la deformación es casi nula, además los esfuerzos que se presentan como máximos son esfuerzos superficiales por contacto, es decir, son esfuerzos locales que se intensifican en las superficies de contacto. Sin embargo, no se traducen en una falla completa del elemento, sino como un posible desgaste o un agrietamiento en la superficie del perno [6], ver Fig. 15.

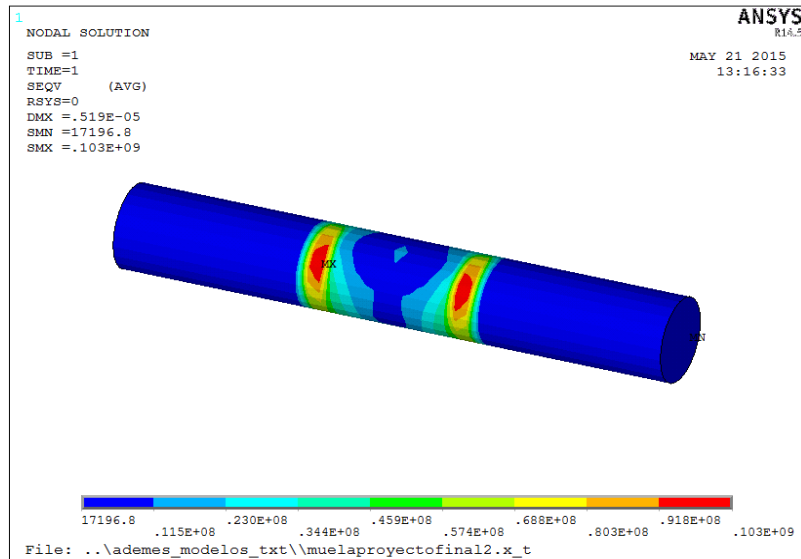


Fig. 15. Esfuerzos presentados en el perno.

### 3.2 Paleta

En la Fig. 16 se muestra la distribución de esfuerzos, se observa que los máximos están ubicados en el compartimento del rodillo de expansión.

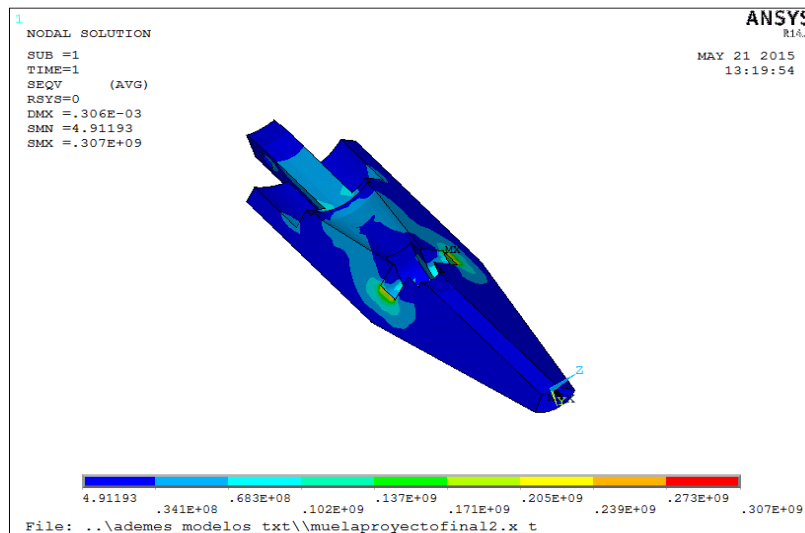


Fig. 16. Esfuerzos presentados en la paleta.



El esfuerzo máximo de von Mises obtenido es de 307 MPa y un desplazamiento máximo de  $0.306 \times 10^{-3} \text{m}$ . Al calcular el factor de seguridad para este elemento se tiene un valor de 2.24, por lo tanto, también se asegura la resistencia del elemento.

### 3.3 Pared de tubo

Los resultados obtenidos para el tubo comprueban que la estructura del ademe permanece sin fallar al realizar la operación para tratar de remover la cáscara, ya que el límite de fluencia del tubo se encuentra en un valor igual a 240 MPa, y el valor máximo de esfuerzo obtenido en la simulación corresponde a 158 MPa según el criterio de von Mises, por lo que el factor de seguridad es de 1.5 con una deformación máxima de  $0.163 \times 10^{-3} \text{m}$ , ver Fig. 17.

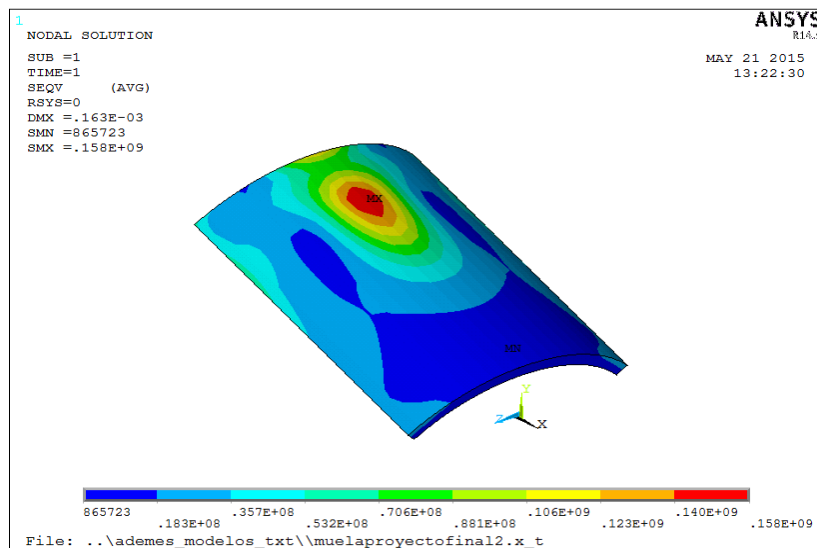


Fig. 17. Esfuerzos presentados en pared de tubo.

### 3.4 Cáscara

“En los cerámicos el esfuerzo de tensión es aproximadamente el 10 % del esfuerzo de compresión” [7]. El análisis de esfuerzos en la cáscara revela que ésta fallará dado que el esfuerzo máximo de compresión del material rocoso es de 15 MPa, por lo que el esfuerzo máximo que corresponde a la tensión es aproximadamente de 1.5 MPa. Si se analizan los resultados se puede observar que se alcanza un esfuerzo de compresión de 16.1 MPa lo que supone una falla en la capa de cáscara por compresión. Por otra parte, también se puede observar que existe un esfuerzo de tensión de 6.85 MPa, valor que determina una falla por tensión. En la Fig. 18 se muestran los valores de esfuerzos obtenidos en base a la teoría del esfuerzo normal máximo.

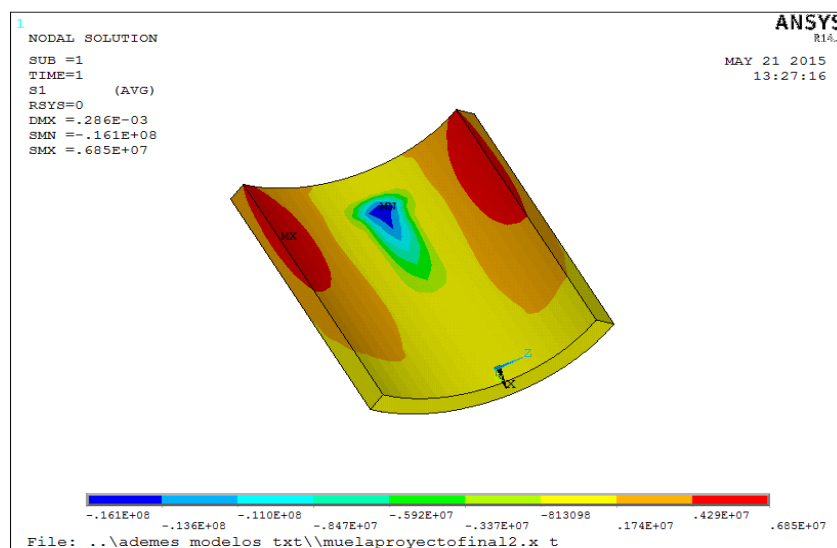


Fig. 18. Esfuerzos de tensión en capa de cáscara.

### 3.5. Resumen de resultados

En la tabla 2 se muestran los resultados de esfuerzo, desplazamiento y factor de seguridad de cada uno de los elementos del sistema analizado, se concluye que los elementos que constituyen la herramienta no presentan falla, ya que el esfuerzo en los elementos está muy por debajo del esfuerzo permisible.

Elemento	Esfuerzo von Mises (MPa)	Desplaza- miento (m)	F.S.
Perno	102	0.51E-5	6.76
Paleta	292	0.297E-3	2.36
Pared de tubo	158	0.163E-3	1.51
Cáscara	3.4	0.0008	0.735

**Tabla 2. Resultados de esfuerzo, desplazamiento y factor de seguridad de cada elemento del sistema.**

## **4. Conclusiones**

Los esfuerzos obtenidos en la capa de sedimentos determinan que ésta fallará por compresión y por tensión, pues cada uno de estos esfuerzos rebasa los esfuerzos últimos correspondientes del material. Todos estos resultados permiten afirmar que la prensa hidráulica usada solamente para fines de reparación de ademes colapsados, puede ser usada también para remover los sedimentos de las paredes de tuberías de pozo profundo. En la simulación se consideraron muchas de las variables como ideales y otras simplemente no se consideraron debido a la imposibilidad de determinarlas, por tal razón,

para comprobar si la herramienta es verdaderamente funcional es necesario realizar un prototipo y probarlo en un caso real. En caso de que la prensa hidráulica funcione con éxito en un caso real podría tener un impacto en la rehabilitación de pozos profundos ya que representaría una nueva técnica para la reparación de los mismos.

Las pruebas de compresión para la caracterización de los sedimentos fue parte fundamental en el desarrollo de la investigación. Con los datos obtenidos en las pruebas se describe el comportamiento del material cuando es sometido a compresión, con la curva obtenida se pudo establecer el modelo constitutivo del material y así llevar a cabo la simulación. Cabe mencionar que no existía ninguna referencia de las propiedades mecánicas del óxido de calcio y que la caracterización del material rocoso fue fundamental en el análisis.

## 5. Referencias

- [1] Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Comisión Nacional del Agua. México. 2007.
- [2] International School of Well Drilling. [www.welldrillingschool.com](http://www.welldrillingschool.com). Abril 2014
- [3] Noma mexicana: NMX-B-050-SCFI-2000 Industria siderúrgica - tubos ranurados de acero al carbono para ademe de pozos de agua para extracción y/o infiltración-absorción de agua – especificaciones. México. 2010.
- [4] Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett, “Diseño en ingeniería mecánica”. Octava edición. 2008. McGraw Hill.
- [5] Noma mexicana: NMX-B-050-SCFI-2000 Industria siderúrgica - tubos ranurados de acero al carbono para ademe de pozos de agua para extracción y/o infiltración-absorción de agua – especificaciones, 2010.
- [6] Arthur P. Boresi, “Advanced mechanics of materials”. Cuarta edición. 2000. John Wiley&Sons, inc.

- [7] Juan Morales Güeto "Tecnología de los materiales cerámicos". Tercera edición.2005. Ediciones Díaz de Santos.